

(19) 日本国特許庁 (J P)

## (12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開平11-66755

(43) 公開日 平成11年(1999) 3月9日

(51) Int.Cl. <sup>8</sup>	識別記号	F I
G 1 1 B 20/14	3 4 1	G 1 1 B 20/14 3 4 1 A
5/02		5/02 B
5/09	3 0 1	5/09 3 0 1 Z
5/66		5/66
H 0 3 M 7/14		H 0 3 M 7/14 B

審査請求 未請求 請求項の数10 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願平10-102667

(22) 出願日 平成10年(1998) 4月14日

(31) 優先権主張番号 特願平9-152710

(32) 優先日 平9(1997) 6月10日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

(31) 優先権主張番号 特願平9-155607

(32) 優先日 平9(1997) 6月12日

(33) 優先権主張国 日本 (J P)

特許法第30条第1項適用申請有り 1996年12月12日 社団法人電子情報通信学会発行の「電子情報通信学会技術研究報告 信学技報 Vol. 96 No. 417」に発表

(71) 出願人 597081765

繪所 壮太郎

神奈川県川崎市麻生区金程4丁目11-16

(72) 発明者 大沢 寿

愛媛県松山市桑原2丁目13-48

(72) 発明者 栗原 義武

愛媛県新居浜市庄内2丁目10番143号

(72) 発明者 岡本 好弘

愛媛県松山市桑原6丁目7-17-206

(72) 発明者 斎藤 秀俊

愛媛県松山市本町6丁目1-1-905

(74) 代理人 弁理士 福森 久夫

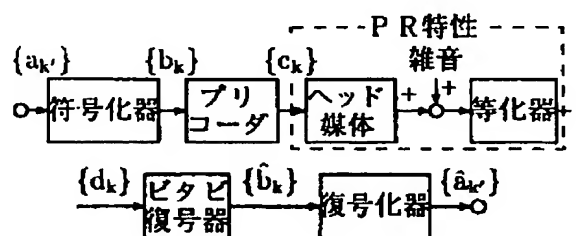
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 垂直磁気記録再生方式およびそれを用いた磁気記録再生装置

## (57) 【要約】

【課題】 優れた S N 比を示し、規格化線密度に優れた垂直磁気記録再生方式およびそれを用いた磁気記録再生装置を提供すること。

【解決手段】 本発明の記録再生方式は、垂直記録用二層媒体と再生に M R ヘッドを用いた垂直磁気記録における記録再生方式として、(1, 7) R L L 符号化方式と正係数 P R M L 方式を用いることを特徴とする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項 1】 垂直記録用二層媒体と再生に MR ヘッドを用いた垂直磁気記録における記録再生方式として、  
(1, 7) RLL 符号化方式と正係数 PRML 方式を用いることを特徴とする記録再生方式。

【請求項 2】 請求項 1 に記載の記録再生方式を用いたことを特徴とする磁気記録再生装置。

【請求項 3】 前記 PRML 方式が PR (1, p, p, 1, ) (p は正の実数) ML 方式であることを特徴とする請求項 1 に記載の記録再生方式。

【請求項 4】 前記 PRML 方式が PR (1, 2, 2, 1, ) ML 方式であることを特徴とする請求項 3 に記載の記録再生方式。

【請求項 5】 前記 PRML 方式が PR (1, 3, 3, 1, ) ML 方式であることを特徴とする請求項 3 に記載の記録再生方式。

【請求項 6】 前記 PRML 方式が PR (1, q, 1) (q は正の実数) ML 方式であることを特徴とする請求項 1 に記載の記録再生方式。

【請求項 7】 前記 PRML 方式が PR (1, 2, 1) ML 方式であることを特徴とする請求項 6 に記載の記録再生方式。

【請求項 8】 前記 PRML 方式が PR (1, r, s, r, 1, ) (r, s は正の実数) ML 方式であることを特徴とする請求項 1 に記載の記録再生方式。

【請求項 9】 前記 PRML 方式が PR (1, 2, 3, 2, 1, ) ML 方式であることを特徴とする請求項 8 に記載の記録再生方式。

【請求項 10】 前記 PRML 方式が、状態縮退型 PRML 方式であることを特徴とする請求項 1 に記載の記録再生方式。

## 【発明の詳細な説明】

## 【0001】

【産業上の利用分野】本発明は、垂直磁気記録再生方式およびそれを用いた磁気記録再生装置に係る。より詳細には、垂直記録用二層媒体と再生に MR ヘッドを用いた垂直磁気記録において、優れた SN 比と大きな規格化線密度とが得られる垂直磁気記録再生方式およびそれを用いた磁気記録再生装置に関する。

## 【0002】

【従来の技術】最近、高感度の MR ヘッドと記録分解能の高い垂直媒体の組み合わせによる高密度記録の検討が盛んに行われている（「日本応用磁気学会誌 19, supplement, S2, pp. 117~121, 1995」、「日本応用磁気学会誌 19, supplement, S2, pp. 122~125, 1995」、「第 5 回垂直磁気記録シンポジウム資料, pp. 115~119 Oct. 1996」、「第 5 回垂直磁気記録シンポジウム資料, pp. 124~128 Oct. 1996」）。長手記録における PRML (Partial Response Maximum-Likelihood) 方式の検討は、従来から広く行われているが、垂直記録にお

ける MR ヘッドとの組み合わせに対する PRML 方式の検討は単層膜媒体の場合のみであり、二層膜媒体の場合はまだ行われていない（「日本応用磁気学会誌 19, S2, pp. 28~33, 1995」）。

【0003】従って、現在、MR ヘッドと二層垂直記録媒体を用いた高密度記録のための方式として、S/N 特性に優れ、また、規格化線密度が大きな記録再生方式は見いだされていない。

## 【0004】

【発明が解決しようとする課題】本発明は、優れた SN 比を示し、規格化線密度に優れた高密度記録媒体の記録再生方式を提供することを目的とする。

## 【0005】

【課題を解決するための手段】本発明の要旨は、垂直記録用二層媒体と再生に MR ヘッドを用いた垂直磁気記録における記録再生方式として、(1, 7) RLL 符号化方式と正係数 PRML 方式を用いることを特徴とする垂直磁気記録再生方式に存在する。

## 【0006】

【発明の実施の形態】以下に本発明の実施の形態を本発明をなすに際して得た知見、その作用等とともに説明する。

【0007】垂直二層膜媒体と MR ヘッドの組み合わせの場合の読み出し点の再生波形は、記録磁化分布に対応した矩形波状となることは知られている（「日本応用磁気学会誌 19, supplement, S2, pp. 117~121, 1995」、「日本応用磁気学会誌 19, supplement, S2, pp. 122~125, 1995」）。

【0008】ダイパルス状の再生波形となる長手記録の場合は、記録再生系が微分特性を有するため、PR (1, 0, -1) ML (通称 PR4ML), PR (1, 1, -1, -1) ML (通称 EPR4ML), PR (1, 2, 0, -2, -1) ML (通称 E<sup>2</sup>PR4ML), PR (1, 1, 0, -1, -1) ML (通称 ME<sup>2</sup>PRML) 等の負の係数を持つ多項式で表される PRML 方式が良好な特性を示す。

【0009】これに対して、矩形波状の再生波形を示す垂直記録（例えば垂直二層膜媒体と MR ヘッドの組み合わせ）の場合には、PR (1, 1) ML, PR (1, 2, 1) ML, PR (1, 3, 1) ML, PR (1, 2, 2, 1) ML, PR (1, 3, 3, 1) 等の正係数の多項式で表される PRML 方式が良好な特性を示すことが予想される。記録符号としては、8/9 符号と

(1, 7) RLL 符号が考えられるが（「信学技報, MR 95-61, Dec. 1995」）、正係数の PRML 方式に対しては (1, 7) RLL 符号のラン長制約を利用したビタビ復号法により、復号器入力系列間のユークリッド距離の最小値  $d_{\min}$  を 8/9 符号の場合より大とすることができ、これによる改善効果が期待できる。一方、従来の長手記録の場合と同様に、負係数の PRML 方式を採用す

る場合には、符号化率が高い8/9符号の方が有利と考えられる。

【0010】そこで本発明者は、MRヘッドと垂直二層膜媒体を用いた場合の垂直磁気記録における、(1, 7) RLL符号化PRML方式として、PR(1, 1) ML, PR(1, 2, 1) ML, PR(1, 3, 1) ML, PR(1, 2, 2, 1) ML, PR(1, 3, 3, 1) ML方式を、8/9符号化PRML方式として、PR4ML, EPR4ML, E<sup>2</sup>PR4ML, ME<sup>2</sup>PR4ML方式を採用したときのビット誤り率(通称BER)特性を求め、比較検討した。

【0011】更に、PR4ML方式に対するこれらのPRML方式のSN比の改善度と規格化線密度の関係について検討した。

【0012】以下に詳細に述べる。

【0013】(記録再生系モデル) 図1に、MRヘッド

と垂直二層膜媒体を用いた垂直磁気記録における、

(1, 7) RLL符号化PRML方式、あるいは8/9符号化PRML方式の記録再生系ブロック図を示す。ここで、{a<sub>k</sub>'}は、ビット間隔T<sub>b</sub>ごとに入力される“1”, “0”の2値入力データ系列で、{b<sub>k</sub>}は(1, 7) RLLあるいは8/9符号化系列、{c<sub>k</sub>}はプリコード出力系列である。(1, 7) RLL符号の場合、プリコードはNRZI記録を行なうために挿入され、{b<sub>k</sub>}と{c<sub>k</sub>}の間には次式の関係が成り立つ。  

$$c_k = b_k + c_{k-1} \pmod{2} \quad (1)$$
 8/9符号は(0, 4/4)符号を用いるものとする。8/9符号に対する各PRML方式のプリコードとして表1に示されるようなものを仮定する。

【0014】

【表1】

PRML方式	プリコード (mod 2)	最大ラン長
PR4ML	$c_k = b_k + c_{k-1}$	4
EPR4ML	$c_k = b_k + c_{k-1}$	3
E <sup>2</sup> PR4ML	$c_k = b_k + c_{k-1}$	2
ME <sup>2</sup> PR4ML	$c_k = b_k + c_{k-1} + c_{k-2} + c_{k-4}$	4

【0015】また、表1には等化器出力系列{d<sub>k</sub>}における“0”の最大ラン長も示しておく。これにより、等化器出力系列における最大ラン長が表1のように制限されるので、安定なクロック再生とゲインコントロールが可能となる。また、8/9符号の場合、プリコード出力系列{c<sub>k</sub>}によりNRZI記録が行なわれるものとする。

$$g'(t) = h'(t) - h'(t - T_s) \quad (2)$$

で与えられるとき、h'(t)を次式のようなローレン

$$h'(t) = B / \{1 + (2t/T_{50})^2\} \quad (3)$$

但し、B, T<sub>50</sub>は、それぞれローレンツ形波形のピーク値と半値幅である。式(2), (3)を積分することに

$$g(t) = \{A/2 \tan^{-1}(\eta_c/K_p)\} \cdot [\tan^{-1}\{2\eta_c t/K_p T_s\} - \tan^{-1}\{2\eta_c(t - T_s)/K_p T_s\}] \quad (4)$$

と表される。但し、Aはg(t)のピーク値で、T<sub>b</sub>をビット間隔とすると、 $\eta_c = T_s/T_b$ ,  $K_p = T_{50}/T_b$ は、それぞれ符号化率、規格化線密度である。(1, 7) RLL符号の場合 $\eta_c = 2/3$ , 8/9符号の場合 $\eta_c = 8/9$ である。

【0018】読み出し点の雑音を、平均が0、両側電力

【0016】垂直二層膜媒体とMRヘッドの組合せの場合の読み出し点の再生波形は、記録磁化分布に対応した矩形波状となり、その微分波形は長手記録の場合と同様ダイパルス状となることが知られている。

【0017】今、高さが1、幅がシンボル間隔T<sub>s</sub>に等しい記録波形に対する読み出し点信号波形g(t)の微分波形が

ツ形波形により表されるものとする。

$$h'(t) = B / \{1 + (2t/T_{50})^2\} \quad (3)$$

より、

スペクトル密度がN<sub>0</sub>/2の白色ガウス雑音と仮定し、記録ヘッドから等化器出力までの伝達特性が所望のバーシャルレスポンス(PR)特性となるように等化器の伝達特性を定めるものとする。すなわち、PR(u<sub>0</sub>, u<sub>1</sub>, u<sub>2</sub>, ..., u<sub>L-1</sub>)方式の場合、式(4)に対する等化器出力波形w(t)が、

$$w(t) = (1/2) \sum_{n=0}^{L-1} u_n r(t - nT_s) \quad (5)$$

となるように等化器の伝達特性を定めればよい。ここで、 $r(t)$  はロールオフ率 $\beta$ および符号間干渉量と等

化器の帯域幅を調整するためのパラメータ $\eta$ を持つナイキスト波形で、

$$r(t) = [\{\sin(\pi t / \eta T_b)\} / (\pi t / \eta T_b)] \cdot [\{\cos(\pi \beta t / \eta T_b)\} / \{1 - (2\beta t / \eta T_b)^2\}] \quad (6)$$

で表される。 $\eta$ の増加に伴い、符号間干渉量は増大するが、帯域幅とそれによる識別点のノイズ強度は減少する。

【0019】等化器の伝達関数 $E(x)$ は、式(4)、(5)のフーリエ変換の比をとることによって得られ、

$$E(x) = \{\tan^{-1}(\eta_c / K_p) / A\} \cdot [\{x \cdot R(x) \cdot \exp(\pi K_p |x|)\} / \sin(\pi \eta_c x)] \cdot \sum_{n=0}^{L-1} u_n \exp\{-j(2n-1)\pi \eta_c x\} \quad (7)$$

と表される。ここで、 $X$ はビットレート $f_b$ で規格化し

た周波数、 $R(x)$ は $f_b r(t)$ のフーリエ変換で、

$$R(x) = \begin{cases} \eta & : |x| < (1-\beta)/2\eta \\ =(\eta/2)\{1 - \sin(\eta\pi/\beta)(|x| - 1/2\eta)\} & : |x| \geq (1+\beta)/2\eta \\ 0 & : |x| \geq (1+\beta)/2\eta \end{cases} \quad (8)$$

によって与えられる。

る。

【0020】式(7)において、負の係数 $u_n$ を持つPR方式、例えばPR4ML、EPR4ML、E<sup>2</sup>PR4ML、ME<sup>2</sup>PR4MLなどの場合の $E(x)$ は、従来の長手磁気記録におけるこれらのPRML方式の伝達関数(「信学論、J79-C-II, 7, pp.366~375, July 1996」)に、微分器としての伝達関数 $x$ を掛けたものと等しくなる。従って、垂直磁気記録におけるこれらのPR方式の等化は、微分等化を行なった後に長手磁気記録のPR等化を行なうことと等価と考えられる。

【0022】  
【表2】

PRML方式	ポストコード(mod 2)
PR4ML	$\hat{b}_k = \hat{c}_k + \hat{c}_{k-1}$
EPR4ML	$\hat{b}_k = \hat{c}_k + \hat{c}_{k-1}$
E <sup>2</sup> PR4ML	$\hat{b}_k = \hat{c}_k + \hat{c}_{k-1}$
ME <sup>2</sup> PR4ML	$\hat{b}_k = \hat{c}_k + \hat{c}_{k-1} + \hat{c}_{k-3} + \hat{c}_{k-4}$

【0021】図1において、プリコード出力系列 $\{c_k\}$ の推定値を $\{\hat{c}_k\}$ とすると、逆プリコーディング演算によるポストコードの出力系列 $\{\hat{b}_k\}$ は、(1, 7)RLL符号の場合、 $\hat{b}_k = \hat{c}_k + \hat{c}_{k-1} \pmod{2}$  (9)と表記される。8/9符号に対する各PRML方式のポストコードを表2に示す。ビタビ復号器ではこれらポストコーディング演算を考慮に入れることが可能である。 $\{\hat{b}_k\}$ は、(1, 7)RLLあるいは8/9の復号器により復号され、出力データ系列 $\{\hat{a}_k\}$ を与え

【0023】(識別点信号波形)プリコード出力系列 $\{c_k\}$ に対する識別点信号波形 $y(t)$ は、

$$y(t) = \sum (2c_i - 1)w(t - iT_s) \quad (10)$$

と表せる。

【0024】M系列により発生した入力データ系列を(1, 7)RLL符号化あるいは8/9符号化したのち、式(1)と表1よりプリコード出力系列を求め、式(10)を用いて求めた(1, 7)RLL符号と8/9符号に対する各PRML方式のアイパターンを図2, 3に、それぞれ示す。

【0025】図2に、(1, 7)RLL符号に対するP

R(1, 1)ML, PR(1, 2, 1)ML, PR(1, 3, 1)ML, PR(1, 2, 2, 1)ML, PR(1, 3, 3, 1)ML, PR(1, 2, 3, 2, 1)MLの各方式のアイパターンを、図3に、8/9符号に対するPR4ML, EPR4ML, E<sup>2</sup>PR4ML, ME<sup>2</sup>PR4MLの各方式のアイパターンを示す。但し、 $\beta = 0.5$ ,  $\eta_{opt}$ としている。ここで、 $\eta = \eta_{opt}$ は、ビット誤り率を最小とする $\eta$ の最適値である。

なお、各アイパターンは、 $t = k T_s$ における最大信号レベルの中央値 $e_1$ が、 $\eta = \eta_c$ のときの最大信号レベル $e_0$ に一致するように $e_0/e_1$ を掛けることにより規格化してある。

【0026】図に見られるように、(1, 7) RLL符号の場合のアイパターンは、8/9符号の場合のアイパターンに比べて、全体的に符号間干渉が大となっている。これは、8/9符号の場合に比べて(1, 7) RLL

$$\sigma^2 = \int_0^{(1+\beta)/2\eta} N(x) dx \quad (11)$$

となる。ここで、 $N(x)$ は識別点における片側雑音電

$$N(x) = \left[ \left\{ \tan^{-1}(\eta_c/K_p) \right\}^2 / a^2 \right] \cdot \left[ \{x^2 \cdot R^2(x) \cdot \exp(2\pi K_p x)\} / \sin^2(\pi \eta_c x) \right] \\ \cdot \sum_{m=0}^{L-1} \sum_{n=0}^{L-1} u_m u_n \cos 2\pi(m-n)\eta_c x \quad (12)$$

である。但し、 $a = A / (N_0 f_b)^{1/2}$ は、読み出し点におけるSN比であり、 $f_b$ に等しいバンド幅における $g(t)$ のピーク値とノイズのrms値との比率として定義される。

【0028】図4及び図6に(1, 7) RLL符号に対する、図5及び図7に8/9符号に対する各PRML方式の識別点雑音電力スペクトルを示す。但し、 $\beta = 0.5$ 、 $\eta = \eta_{opt}$ とする。一般に、垂直記録における微分波形 $h'(t)$ の半値幅は、長手記録の場合の孤立再生波形の半値幅より小である。図4と図5は $K_p = 1.5$ とした場合、図6と図7は $K_p = 2.5$ とした場合、のそれぞれ結果である。

【0029】なお、図2, 3のアイパターンのレベルを $e_0/e_1$ で規格したことに合わせて、各スペクトルは $(e_0/e_1)^2$ を掛けることにより規格化してある。

【0030】図4と図5からは、(1, 7) RLL符号の場合の方が、8/9符号の場合に比べて識別点雑音電力スペクトルは全体的に小となっており、高域雑音成分も小となっていることが分かった。これは、後者に比べ

$$d_k = y(k T_s) \\ = \sum_i (2c_i - 1) w\{(k-i)T_s\} \quad (13)$$

となる。

【0033】一方、ビタビ復号器入力雑音系列 $\{n_k\}$ は、等化器の伝達関数により定まる有色雑音となり、読み出し点における白色雑音系列と等化器のインパルス応答との重ね合わせにより求めることができる。

【0034】ここで、(1, 7) RLL符号に対するPRML方式としてPR(1, 2, 2, 1) ML方式を例にとって述べることにする。(1, 7) RLL符号の場合、プリコード出力系列 $\{c_k\}$ における“0”あるいは“1”のラン長は2から8に制限される。従って、 $\{c_k\}$ 中には“010”，“101”という系列は現

L符号の場合の方が、 $\eta_{opt}$ と $\eta_c$ との差が大となっているためである。一方、タイミングマージンに関しては、(1, 7) RLL符号の方が8/9の場合より大となっている。

【0027】(識別点雑音電力) 識別点雑音電力 $\sigma^2$ は、式(7)を用いて $N_0 |E(x)|^2/2$ を積分することによって得られ、

て、前者の $\eta_{opt}$ が大きいためである。図4に示す

(1, 7) RLL符号のうちでは、PR(1, 1) ML方式の雑音電力スペクトルが最小となり、次いでPR(1, 2, 1) ML, PR(1, 2, 2, 1) ML, PR(1, 3, 1) ML, PR(1, 3, 3, 1) ML方式の順となっている。また、図5に示す8/9符号のうちでは、ME<sup>2</sup>PR 4 MLの雑音電力スペクトルが最小となり、次いで、PR 4 ML, EPR 4 ML, E<sup>2</sup>PR 4 ML方式の順となっている。

【0031】また、図6と図7からは、(1, 7) RLL符号に対する識別点雑音電力スペクトルと高域雑音成分は、8/9符号に対するものと比較して全体的に小さく、かつ、(1, 7) RLL符号に対する $\eta_{opt}$ の値が8/9符号に対するものより大きくなっている、(1, 7) RLL符号に対する等化器の帯域幅が8/9符号に対するものと比較して狭くなることが分かった。

【0032】(PRML方式) ビタビ復号器入力信号系列 $\{d_k\}$ は、式(10)を $T_s$ ごとにサンプリングすることにより得られ、

われない。これを考慮すると、PR(1, 2, 2, 1) ML方式の場合、時刻 $t = k T_s$ における状態は表3のように定めることができる。

【0035】

【表3】

状態 $S_k$	$c_{k-2}$	$c_{k-1}$	$c_k$
$S_0$	0	0	0
$S_1$	0	0	1
$S_2$	0	1	1
$S_3$	1	0	0
$S_4$	1	1	0
$S_5$	1	1	1

列  $\{d_k\}$  は、式 (5) , (6) , (13) より、

【0036】  $\eta = \eta_c$  のときのビタビ復号器入力信号系

$$d_k = c_k + 2c_{k-1} + 2c_{k-2} + c_{k-3} - 3 \quad (14)$$

となる。これを用い、更に上記のラン長制約を考慮する ML方式のビタビ復号器は表4を基に構成できる。  
とビタビ復号器の状態推移表は表4のようになる。 【0037】

(1, 7) RLL符号に対するPR (1, 2, 2, 1) 【表4】

前状態	現状態		$d_k$	
	$c_k$	$c_k$	$c_k$	$c_k$
	0	1	0	1
$S_0$	$S_0$	$S_1$	-3	-2
$S_1$	$S_1$	$S_2$	0	0
$S_2$	$S_4$	$S_5$	1	2
$S_3$	$S_0$	$S_1$	-2	-1
$S_4$	$S_3$	$S_4$	0	0
$S_5$	$S_4$	$S_5$	2	3

【0038】このように、(1, 7) RLL符号の場合ラン長制約を使用することにより、状態数を8状態から6状態に減らすことができ、ビタビ復号器が簡単化される。また、(1, 7) RLL符号の場合ラン長制約はPR (1, 2, 2, 1) ML方式のACS (Add Compare Select) 数を8から4に削減する効果ももたらす。ゆえに、表4において、PR (1, 2, 2, 1) ML方式のACS (Add Compare Select) 数を4と記した。他のPRML方式についても同様に簡単化が可能であり、PR (1, 3, 3, 1) ML, PR (1, 2, 1) ML, PR (1, 3, 1) ML, PR (1, 1) ML方式の状態数は、それぞれ6, 4, 4, 2となる。

【0039】さらに、(1, 7) RLL符号の場合ラン長制約のもう一つの重要な効果は、 $\{d_k\}$  の全ての可能性のある一連の系列間のユークリッド距離の最小値  $d_{min}$  を増大するとBER特性の改善がもたらされることである。他のPRML方式についても、(1, 7) RLL符号のラン長制約と同様に、ビタビ復号器を形成できる。

【0040】また、ACS数は、それぞれ4, 2, 2, 2となる。図8に、表4より得られるPR (1, 2, 2, 1) ML方式のビタビ復号器のトレリス線図を示

す。なお、図中の枝に付した値は  $c_k/d_k$  を表す。トレリス線図上の枝の長さを負の対数尤度関数で表すことによりメトリックが求まる。

【0041】このメトリックにより最小値判定を行ない、生き残りパスを過去に遡ることによって最尤系列  $\{\hat{c}_k\}$  が求まる。更に、式 (9) の演算により (1, 7) RLL復号器入力系列  $\{\hat{b}_k\}$  が得られる。

【0042】一方、8/9符号の場合、(1, 7) RLL符号のようなラン長制約によるビタビ復号器の状態数の削減はなく、PR方式が拘束する応答の長さ、すなわちPR ( $u_0, u_1, u_2, \dots, u_{N-1}$ ) MLという記述における  $u_k$  の個数  $N$  を用いると、 $2^{N-1}$  個の状態を必要とする。従って、ME<sup>2</sup>PR 4ML, E<sup>2</sup>PR 4ML, EPR 4ML, PR 4ML方式の状態数は、それぞれ16, 16, 8, 4となる。また、ACS数も状態数と同じだけ必要とする。

【0043】従って、(1, 7) RLL符号に対するPR (1, 2, 1) ML, PR (1, 2, 2, 1) ML, PR (1, 3, 3, 1) ML方式は、8/9符号に対するPRML方式と比較して状態数及びACS数が小さくなるにつれて、大きな  $(d_{min})^2$  が得られる。

【0044】(性能比較) 図9及び図10に、コンピュータシミュレーションにより求めた、(1, 7) RLL符号と8/9符号に対する各PRML方式のビット誤り率(BER)特性を示す。但し、図9は $K_p=1.5$ ,  $\beta=0.5$ ,  $\eta=\eta_{opt}$ とした場合、図10は $K_p=2.5$ ,  $\beta=0.5$ ,  $\eta=\eta_{opt}$ とした場合、をそれぞれ示している。

【0045】図9において、○, △, □, ◇, ☆印はそれぞれ(1, 7) RLL符号に対するPR(1, 1) ML, PR(1, 2, 1) ML, PR(1, 3, 1) ML, PR(1, 2, 2, 1) ML, PR(1, 3, 3, 1) ML方式の場合を、また●, ▲, ■, ◆印は、それぞれ8/9符号に対するPR4ML, EPR4ML, E<sup>2</sup>PR4ML, ME<sup>2</sup>PR4ML方式の場合を表している。

【0046】図10において、○, △, □, ◇印はそれぞれ(1, 7) RLL符号に対するPR(1, 2, 1) ML, PR(1, 2, 2, 1) ML, PR(1, 3, 3, 1) ML, PR(1, 2, 3, 2, 1) ML方式の場合を、また●, ▲, ■, ◆印は、それぞれ8/9符号に対するPR4ML, EPR4ML, E<sup>2</sup>PR4ML, ME<sup>2</sup>PR4ML方式の場合を表している。

【0047】図9に見られるように、8/9符号の場合

$$SNR_g \doteq 10 \log_{10} (d_{min})^2 \quad [dB] \quad (15)$$

となる。実際には、入力雑音系列は有色雑音系列であり、等化器の変換関数により特徴づけられる。従って、SN比の利得(SNR<sub>g</sub>)はその相関の影響によって劣化する場合がある。しかしながら、SN比の利得(SNR<sub>g</sub>)を用いて各PRML方式の特性をおおよそ評価することができる。各PRML方式におけるSN比の利得(SNR<sub>g</sub>)は、表5で与えられる $(d_{min})^2$ を式(15)に代入することにより求まる。

【0050】表5に各PRML方式に対する

に比べて(1, 7) RLL符号の場合のビット誤り率(BER)特性が良好となっている。PR(1, 2, 2, 1) MLとPR(1, 3, 3, 1) ML方式は、ほぼ同一の最良のビット誤り率特性を示している。次いで、PR(1, 2, 1) MLとPR(1, 3, 1) ML, PR(1, 1) ML, ME<sup>2</sup>PR4ML, E<sup>2</sup>PR4ML, EPR4ML, PR4ML方式の順となっている。

【0048】また図9と同様に図10においても、(1, 7) RLL符号の場合のビット誤り率(BER)特性は8/9符号の場合より良好であり、中でもPR(1, 2, 3, 2, 1) ML方式は最も優れていることが分かった。次いで、PR(1, 2, 2, 1) ML, PR(1, 3, 3, 1) ML, PR(1, 2, 1) ML, ME<sup>2</sup>PR4ML, E<sup>2</sup>PR4ML, EPR4ML, PR4ML方式の順となっている。

【0049】いずれのPRML方式もアイの開口率が同程度とすると、識別点雑音スペクトルが小さいほど、等化によるSN比劣化は小となる。また、ビタビ復号器入力系列間のユークリッド距離の最小値を $d_{min}$ とすると、ビタビ復号によるしきい値検出に対するSN比の利得(SNR<sub>g</sub>)は近似的に、ビタビ復号器入力雑音が白色雑音の場合、

( $d_{min})^2$ 、状態数(ACS数)、信号レベル数を示す。また、同表にはトレリス線図の対称性を利用して状態数を半減できる状態縮退型PRML(FS(Folding State)-PRML)方式をPR(1, 2, 2, 1) MLとPR(1, 3, 3, 1) ML方式に適用したFS-PR(1, 2, 2, 1) MLとFS-PR(1, 3, 3, 1) ML方式の場合も併せて示す。

【0051】

【表5】

PRML方式	$(d_{min})^2$	状態数 (ACS数)	信号 レベル
PR(1,1)ML	2	2 (2)	3
PR(1,2,1)ML	6	4 (2)	4
PR(1,3,1)ML	11	4 (2)	4
PR(1,2,2,1)ML	10	6 (4)	7
PR(1,3,3,1)ML	20	6 (4)	7
PR(1,2,3,2,1)ML	18	10 (6)	10
PR4ML	2	$2 \times 2$ ( $2 \times 2$ )	3
EPR4ML	4	8 (8)	5
E <sup>2</sup> PR4ML	6	16 (16)	7
MB <sup>2</sup> PR4ML	2	16 (16)	5
FS-PR(1,2,2,1)ML	10	3 (2)	4
FS-PR(1,3,3,1)ML	18	3 (2)	4

【0052】(1, 7) RLL符号に対するPR(1, 2, 3, 2, 1)MLとPR(1, 2, 2, 1)ML方式は、比較的雑音電力スペクトルが小さく、しかも $(d_{min})^2$ が大きいことからSN比の利得(SNR<sub>G</sub>)が大きいという優れた特性を示す。PR(1, 3, 3, 1)ML方式は、その大きな雑音電力スペクトルを除いて比較的良好な特性を示しており、その理由はここで検討したPRML方式のうちでSN比の利得(SNR<sub>G</sub>)が最大だからである。また最小の雑音電力スペクトルを持つPR(1, 2, 1)ML方式も良好な特性を示している。PR(1, 2, 3, 2, 1)ML方式を除いたこれら3つの方式は、8/9符号に対するEPR4ML方式より状態数(ACS数)が小であるが、信号レベル数が大である。PR(1, 2, 3, 2, 1)ML方式は、8/9符号に対するEPR4ML方式より状態数(ACS数)が幾らか大きい、2倍の信号レベル数を有する。FS-PR(1, 2, 2, 1)MLとFS-PR(1, 3, 3, 1)ML方式は、 $(d_{min})^2$ が大で、しかも状態数(ACS数)、信号レベル数共に小で、ヒタヒ復号

法の簡単化が図れるため、期待できる。

【0053】なお、表5に示した $(d_{min})^2$ は、 $\eta = \eta_e$ としたときの信号レベルから求めた値であり、 $\eta = \eta_{opt}$ の場合には、図2, 3に見られるように、これらの信号レベルからずれることによるSN比の利得(SNR<sub>G</sub>)の劣化が生じる。また、実際には復号器入力雑音が有色雑音となるので、その相関の影響によっても特性が劣化する。このような理由から、最終的な誤り率(BER)特性は、図9(K=1.5の場合)および図10(K=2.5の場合)のようになる。

【0054】表6は、図9から得られた8/9符号化PR4ML方式(K=1.5、 $\beta=0.5$ 、 $\eta = \eta_{opt}$ 、BER=10<sup>-4</sup>)に対する各PRML方式のSN比の改善度(SNR<sub>I</sub>)である。表7は、図10から得られた8/9符号化PR4ML方式(K=2.5、 $\beta=0.5$ 、 $\eta = \eta_{opt}$ 、BER=10<sup>-4</sup>)に対する各PRML方式のSN比の改善度(SNR<sub>I</sub>)である。

【0055】

【表6】



(1, 7) RLL符号		8/9符号	
PRML方式	SNR <sub>I</sub>	PRML方式	SNR <sub>I</sub>
PR(1, 1)ML	3.9dB	EPR4ML	1.5dB
PR(1, 2, 1)ML	7.0dB	E <sup>2</sup> PR4ML	1.8dB
PR(1, 3, 1)ML	6.9dB	MR <sup>2</sup> PR4ML	2.8dB
PR(1, 2, 2, 1)ML	7.7dB		
PR(1, 3, 3, 1)ML	7.6dB		

【0056】

【表7】

(1, 7) RLL符号		8/9符号	
PRML方式	SNR <sub>I</sub>	PRML方式	SNR <sub>I</sub>
PR(1, 2, 1)ML	11.9dB	EPR4ML	2.9dB
PR(1, 2, 2, 1)ML	12.5dB	E <sup>2</sup> PR4ML	4.6dB
PR(1, 3, 3, 1)ML	11.9dB	MR <sup>2</sup> PR4ML	5.5dB
PR(1, 2, 3, 2, 1)ML	13.8dB		

【0057】表6及び7から、(1, 7) RLL符号に対するPRML方式の方が、8/9符号に対するPRML方式よりSN比の改善度(SNR<sub>I</sub>)が大きいことが分かった。これは、(1, 7) RLL符号の場合、ラン長制約を利用することにより一般に(d<sub>min</sub>)<sup>2</sup>が大となることと、雑音電力スペクトルが8/9符号よりも小さいことによる。特に、(1, 7) RLL符号化PR(1, 2, 3, 2, 1)ML方式は、最も優れたSN比の改善度(SNR<sub>I</sub>)、約13.8dBが得られることが明らかとなった。

【0058】PR4ML方式に対する各PRML方式のSN比の改善度と規格化線密度の関係を、図11(K<sub>p</sub>=1.5の場合)および図12(K<sub>p</sub>=2.5の場合)に示す。

【0059】図11からは、K<sub>p</sub>が1.5より大となると、PR(1, 2, 2, 1)ML方式の改善度が最大となり、次いで、PR(1, 3, 3, 1)ML, PR(1, 2, 1)ML, PR(1, 3, 1)ML方式の順となっていることが分かった。

【0060】また、図12からは、図11で最も高いSN比の改善度を示したPR(1, 2, 2, 1)ML方式よりも、PR(1, 2, 3, 2, 1)ML方式の方がさらに優れたSN比の改善度を有することが明らかとなった。分かった。すなわち、PR(1, 2, 3, 2, 1)ML方式は、1.5 ≤ K<sub>p</sub> ≤ 3の範囲にある線密度の全てに対してSN比の改善度が最大となる。

【0061】さらに、図11および図12から、いずれのPRML方式でも線密度Kの増大に伴いSN比の改善

度が大きくなっていることが確認された。

【0062】上記実施の形態では、PRML方式の係数は(1, 3, 3, 1)、(1, 3, 1)、(1, 2, 3, 2, 1)など全て正の整数の場合を示したが、(1, p, p, 1)、(1, q, 1)、(1, r, s, r, 1)（ただし、係数p, q, r, sは正の実数）で示される正係数PRML方式にも容易に適用可能である。

【0063】また、上述した記録再生方式を、垂直記録用二層媒体と再生にMRヘッドを用いた垂直磁気記録に採用することによって、記憶容量の大きな磁気記録再生装置が得られることは言うまでもない。

【0064】

【発明の効果】本発明によれば、優れたSN比を示し、規格化線密度に優れた高密度記録媒体の記録再生方式およびそれを用いた磁気記録再生装置を提供することが可能となる。

【図面の簡単な説明】

【図1】記録再生系のブロック図である。

【図2】(1, 7) RLL符号に対する各PRMLのアイパターンである(β=0.5, η=η<sub>opt</sub>)。

【図3】8/9符号に対する各PRMLのアイパターンである(β=0.5, η=η<sub>opt</sub>)。

【図4】(1, 7) RLL符号に対する各PRMLの識別雑音電力スペクトルである(K<sub>p</sub>=1.5, β=0.5, η=η<sub>opt</sub>とした場合)。

【図5】8/9符号に対する各PRMLの識別点雑音電力スペクトルである(K<sub>p</sub>=1.5, β=0.5, η=

$\eta_{opt}$ とした場合)。

【図6】(1, 7) RLL符号に対する各PRMLの識別雑音電力スペクトルである ( $K_p=2.5$ ,  $\beta=0.5$ ,  $\eta=\eta_{opt}$ とした場合)。

【図7】8/9符号に対する各PRMLの識別点雑音電力スペクトルである ( $K_p=2.5$ ,  $\beta=0.5$ ,  $\eta=\eta_{opt}$ とした場合)。

【図8】(1, 7) RLL符号化PR(1, 2, 2, 1) ML方式のトレリス線図である。

【図9】誤り率 (BER) 特性 ( $K_p=1.5$  の場合)

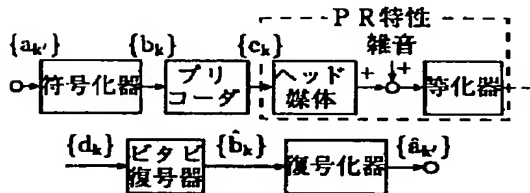
を示すグラフである。

【図10】誤り率 (BER) 特性 ( $K_p=2.5$  の場合) を示すグラフである。

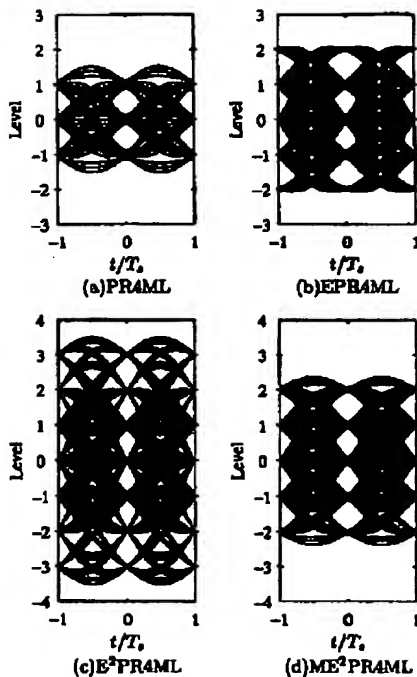
【図11】8/9符号化PR4ML方式 ( $K_p=1.5$  の場合) に対する各PRML方式のSN比の改善度と規格化線密度の関係を示すグラフである。

【図12】8/9符号化PR4ML方式 ( $K_p=2.5$  の場合) に対する各PRML方式のSN比の改善度と規格化線密度の関係を示すグラフである。

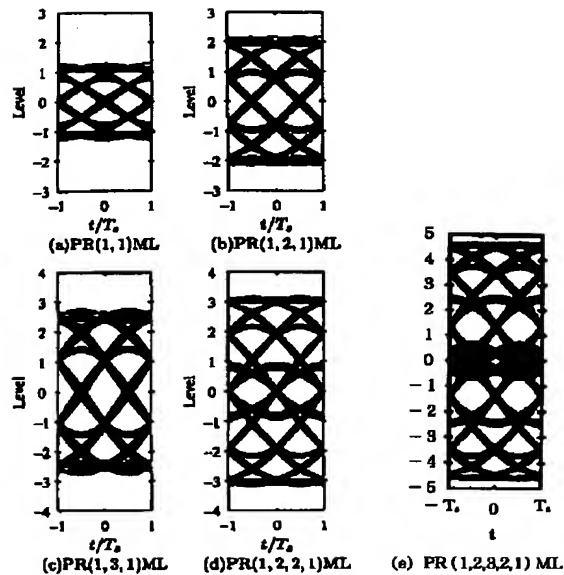
【図1】



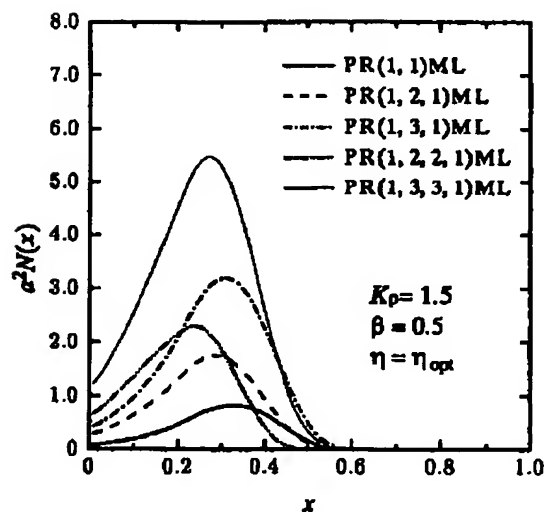
【図3】



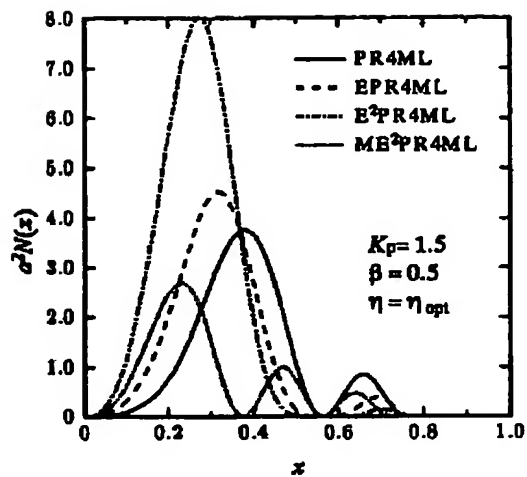
【図2】



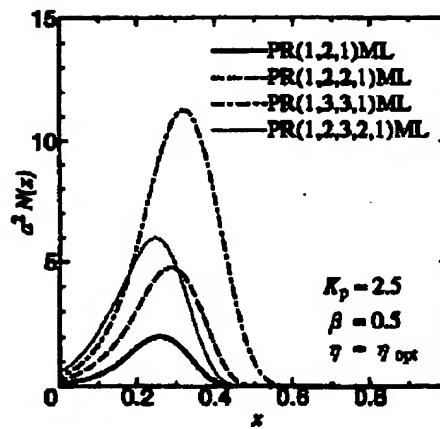
【図4】



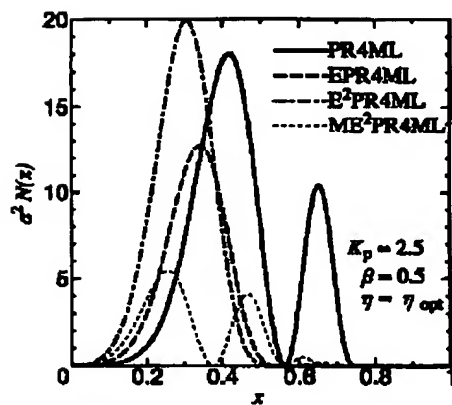
【図 5】



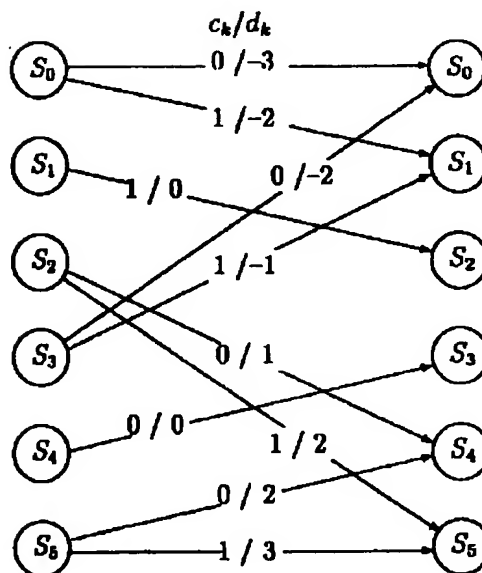
【図 6】



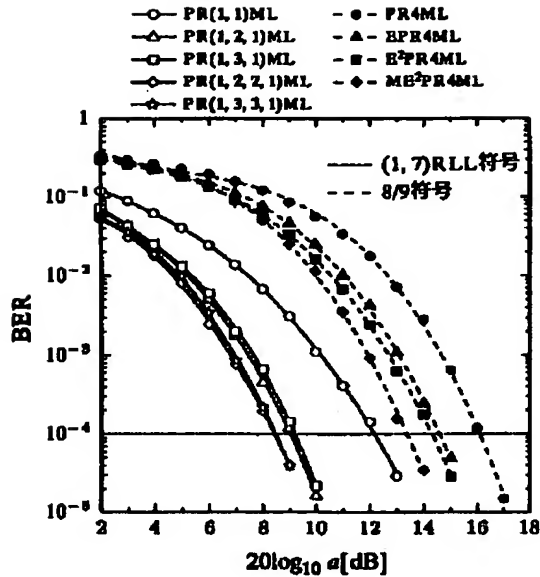
【図 7】



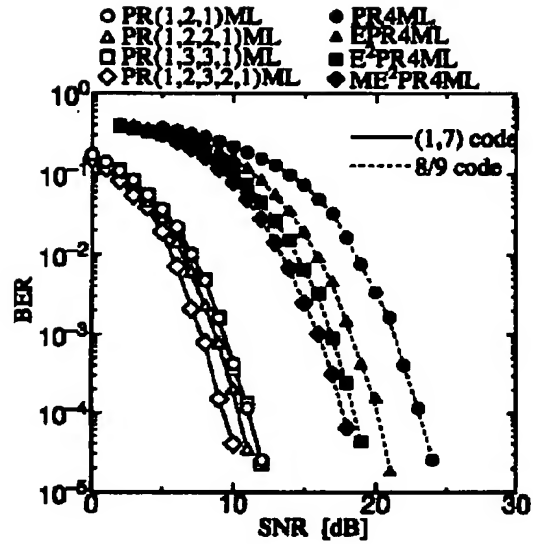
【図 8】



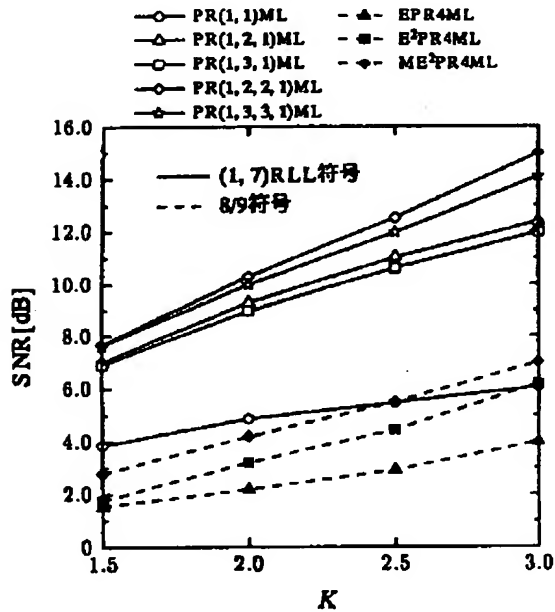
【図 9】



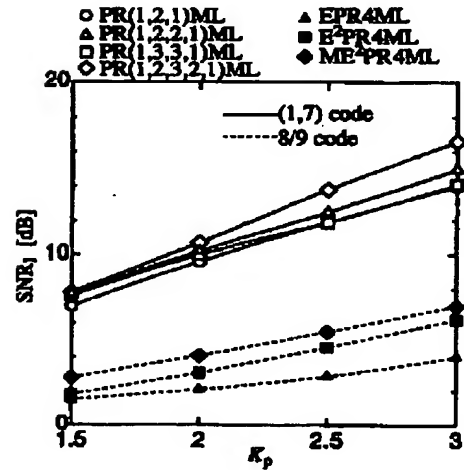
【図 10】



【図 11】



【図 12】



フロントページの続き

(72)発明者 村岡 裕明  
宮城県仙台市太白区郡山 6 丁目 5-7-502

(72)発明者 中村 慶久  
宮城県仙台市泉区将監 1 丁目 2-2